

SÉRIE A N° 172

N° D'ORDRE

194

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

P.-J. Mac LAUGHLIN

Professeur au Séminaire des Irlandais

1^{re} THÈSE — Recherches sur les gros ions.

2^e THÈSE — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le **29 MAR** — 1928 devant la Commission d'examen

MM. Ch. MAURAIN. *Président.*

BRUHAT. } *Examineurs.*
LANGEVIN. }

PARIS (V°)

LES PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

49, Boulevard Saint-Michel, 49

SÉRIE A N° 172

N° D'ORDRE

194

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

P.-J. Mac LAUGHLIN

Professeur au Séminaire des Irlandais

1^{re} THÈSE — Recherches sur les gros ions.

2^e THÈSE — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le **29 MAR** 1928 devant la Commission d'examen

MM. Ch. MAURAIN. *Président.*

BRUHAT. } *Examineurs.*
LANGEVIN. }

PARIS (V°)

LES PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE

49, Boulevard Saint-Michel, 49

1928

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du globe.

Doyens honoraires P. APPELL, M. MOLLIARD.

Prof. honoraires

P. PUISEUX.
V. BOUSSINESQ.
A. JOANNIS.
H. LE CHATELIER.
H. LEBESGUE.
A. FERNBACH.
A. LEDUC.

Professeurs

Émile PICARD . . . Analyse supérieure et algèbre supérieure
G. KÖNIGS . . . Mécanique physique et expérimentale.
E. GOURSAT . . . Calcul différentiel et calcul intégral.
P. JANET . . . Electrotechnique générale.
F. WALLERANT . . . Minéralogie.
H. ANDOYER . . . Astronomie.
P. PAINLEVÉ . . . Mécanique analytique et mécanique céleste
Gabriel BERTRAND . . . Chimie biologique.
M^{me} P. CURIE . . . Physique générale et radioactivité.
M. CAULLERY . . . Zoologie (Évolution des êtres organisés).
C. CHABRIÉ . . . Chimie appliquée.
G. URBAIN . . . Chimie minérale.
Emile BOREL . . . Calcul des probabilités et Physique mathém.
L. MARCHIS . . . Aviation.
Jean PERRIN . . . Chimie physique.
Rémy PERRIER . . . Zoologie (Enseignement P. C. N.).
H. ABRAHAM . . . Physique.
M. MOLLIARD . . . Physiologie végétale.
E. CARTAN . . . Géométrie supérieure.
L. LAPICQUE . . . Physiologie générale.
E. VESSIOT . . . Théorie des fonctions et théories des transformations.
A. COTTON . . . Physique générale.
J. DRACH . . . Application de l'analyse à la géométrie.
Charles FABRY . . . Physique.
Charles PÉREZ . . . Zoologie.
Léon BERTRAND . . . Géologie appliquée et géologie régionale.
R. LESPIEAU . . . Théories chimiques.
E. RABAUD . . . Biologie expérimentale.
P. PORTIER . . . Physiologie comparée.
E. BLAISE . . . Chimie organique.
P.-A. DANGEARD . . . Botanique.
P. MONTEL . . . Mécanique rationnelle.
P. WINTREBERT . . . Anatomie et histologie comparées.
O. DUBOSQ . . . Biologie maritime.
G. JULIA . . . Mathématiques générales.
A. JOB . . . Chimie générale.
A. MAILHE . . . Étude des combustibles.
L. LUTAUD . . . Géographie physique.
Eugène BLOCH . . . Physique théorique et physique céleste.
Henri VILLAT . . . Mécanique des fluides et applications.
Ch. JACOB . . . Géologie.
N... . . Chimie appliqué.



E. HÉROUARD . . . Zoologie.	E. DARMOIS . . . Physique.
E. PÉCHARD . . . Chimie (Enseigt P. C. N.).	G. BRUHAT . . . Physique.
V. AUGER . . . Chimie analytique.	H. MOUTON . . . Chimie physique.
M. GUICHARD . . . Chimie minérale.	L. JOLEAUD . . . Paléontologie.
A. GUILLET . . . Physique	M. JAVILLIER . . . Chimie biologique.
C. MAUGUIN . . . Minéralogie.	A. DUFOUR . . . Physique (P. C. N.).
L. BLARINGHEM . . . Botanique.	F. PICARD . . . Zoologie (Évolution des êtres organisés).
A. MICHEL-LÉVY . . . Pétrographie.	ROBERT-LÉVY . . . Zoologie.
A. DERREIMS . . . Géologie	L. DUNOYER . . . Optique appliquée.
R. DONGIER . . . Physique du globe.	A. GUILLIERMOND . . . Botanique (P. C. N.).
A. DENJOY . . . Calcul différ. et intégral.	A. DEBIERNE . . . Radioactivité.
H. BÉNARD . . . Physique (P. C. N.).	

Secrétaire Daniel TOMBECK.

A MA MÈRE

A MONSIEUR CH. MAURAIN

Hommage respectueux de reconnaissance.

A LA MÉMOIRE DE MON PÈRE

RECHERCHES SUR LES GROS IONS

CHAPITRE PREMIER

INTRODUCTION

Les poussières que renferment les basses couches de notre atmosphère se divisent en deux classes principales : les poussières sèches et les poussières liquides. Les poussières liquides peuvent condenser la vapeur d'eau, mais les poussières sèches n'ont pas cette propriété ⁽¹⁾. La plupart des poussières sèches ont un rayon qui varie entre 10^{-4} cm. et 10^{-5} cm : elles sont étudiées à l'aide de la jauge-étalon et du compteur d'Owens ⁽²⁾. Plus importantes au point de vue de leur nombre sont les poussières liquides ⁽³⁾, mises en évidence par les méthodes de condensation de Coulier et d'Aitken : on les nomme noyaux d'Aitken, et leur rayon serait voisin de 10^{-6} cm. Une méthode électrique, plus sûre que les méthodes de condensation, convient mieux pour l'étude de ces poussières, et pour l'étude de toute poussière, liquide ou sèche, de rayon inférieur à 10^{-6} cm. Cette méthode dépend du fait qu'une certaine proportion des poussières portent des charges électriques : ce sont les ions.

Depuis les travaux de Langevin en 1905, on a admis l'existence, sous une forme très stable dans l'atmosphère, de deux espèces d'ions : les petits ions de dimensions moléculaires, et les gros ions, qui seraient de véritables particules analogues ou identiques aux noyaux d'Aitken ⁽⁴⁾. Le nombre de gros ions présents dans l'air est généralement supérieur au nombre de petits ions, et comme les gros ions condensent la vapeur d'eau à peine sursaturée, alors que les petits ions ne provoquent la condensation que pour une grande sursaturation, les gros ions joueraient un rôle important dans la physique du Globe.

Les chercheurs ne se sont pas beaucoup préoccupés des gros ions, malgré leur importance au point de vue des phénomènes météorologiques. Outre les travaux de Langevin, qui les découvrit, et qui a construit, en collaboration avec le regretté Moulin (mort au champ d'honneur en 1914),

⁽¹⁾ Voir A. WIGAND, *Meteor. Zeit.*, **30**, janv. 1913, p. 10 ; G. C. SIMPSON, *Proc. Roy. Inst.*, **24** (1925), p. 54 ; et R. K. BOYLAN, *Proc. Roy. Irish. Acad.*, **37** (1926), p. 58.

⁽²⁾ Voir *Ninth Report on Atmospheric Pollution*. H. M. Stationary Office, London, 1924.

⁽³⁾ A Dublin, les poussières liquides sont vingt fois plus nombreuses que les poussières sèches. BOYLAN, *loc. cit.*

⁽⁴⁾ En 1909, Pollock a soulevé la question de l'existence d'une troisième espèce d'ions, les ions intermédiaires, dont l'existence paraît être confirmée par les expériences les plus récentes.

un appareil enregistreur de ces ions, nous n'avons relativement à la teneur en gros ions de l'atmosphère que les travaux de Pollock, en 1909, à Sydney (117 observations), de McClelland et Kennedy, en 1912-13, à Dublin et à Dalkey (400 groupes d'observations), de Gockel, en 1917, à Fribourg (300 observations) et de J.-J. Nolan et ses élèves, en 1924-25, à Dublin (1700 observations) ⁽¹⁾. Ces travaux ayant soulevé certaines difficultés, nous avons pensé qu'il y avait lieu de multiplier les observations. Dans ce but, nous avons fait deux séries de mesures sur les gros ions à Paris : la première série (d'avril à août 1925 : 1.200 observations), a été exécutée au rez-de-chaussée occupé alors par l'Institut de Physique du Globe, 176, rue de l'Université, près de la Tour Eiffel, dans le quartier du Champ-de-Mars (station 1) ; et la deuxième série (de novembre 1925 à juin 1926 : 6.500 observations), a été exécutée au 3^e étage du local occupé maintenant par cet Institut, 191, rue Saint-Jacques, dans le quartier du Val-de-Grâce (station 2).

A défaut de mesures continues sur les ions à l'aide d'un appareil enregistreur, nos observations peuvent présenter un intérêt particulier à cause de leur grand nombre et à cause des conditions très variées dans lesquelles elles ont été faites. Exécutées la plupart du temps tour à tour sur les ions positifs et négatifs, elles constituent la première étude étendue des charges libres de l'atmosphère par une méthode directe et absolue.

CHAPITRE II

MÉTHODE ET APPAREILS DE MESURE

Méthode. — Pour mesurer le nombre d'ions présents dans l'air, nous avons employé la méthode du courant gazeux, dont le principe est le suivant :

Un courant d'air uniforme s'écoule à l'intérieur d'un tube métallique A (voir fig. 1) qui forme l'armature externe d'un condensateur cylindrique. On établit à l'aide d'une batterie de piles P un champ électrique entre le tube et une électrode axiale centrale B : celle-ci est reliée à un électromètre E. Suivant le sens du champ, les ions positifs ou négatifs se déplacent vers l'électrode qu'ils atteindront tous si le débit d'air n'excède pas une certaine valeur critique D. L'électromètre mesurera la charge ainsi accumulée.

En admettant que chaque ion porte la charge élémentaire, $e = 4,8.10^{-10}$ U.E.S. ⁽²⁾, on obtient la teneur en ions de l'air étudié en divisant l'intensité du courant électrique par le produit du débit d'air et de la charge élémentaire. En variant l'intensité du champ ou le débit d'air, on peut recueillir

⁽¹⁾ Les principaux travaux de laboratoire sur les gros ions ont été faits à Dublin par McClelland, Nolan et leurs élèves, à Paris par de Broglie, et à Sydney par Pollock et ses élèves. Actuellement, on fait des observations sur les ions atmosphériques à la station de l'Institut de Physique du Globe, située au Val-Joyeux, à 25 kilomètres de Paris.

⁽²⁾ Cette hypothèse a été vérifiée pour les gros ions de l'air d'une pièce par NOLAN, BOYLAN et DE SACHY, *P. R. I. A.*, **37** (1925), p. 4. Les gros ions issus des flammes portent plusieurs charges : KENNEDY, *P. R. I. A.*, **33** (1916), p. 73.

tous les ions de mobilité supérieure à une mobilité déterminée, d'où on peut déduire le nombre spécifique des ions de chaque espèce.

Dans la pratique, on utilise deux appareils de dimensions différentes, l'un pour les gros ions et l'autre pour les petits ions.

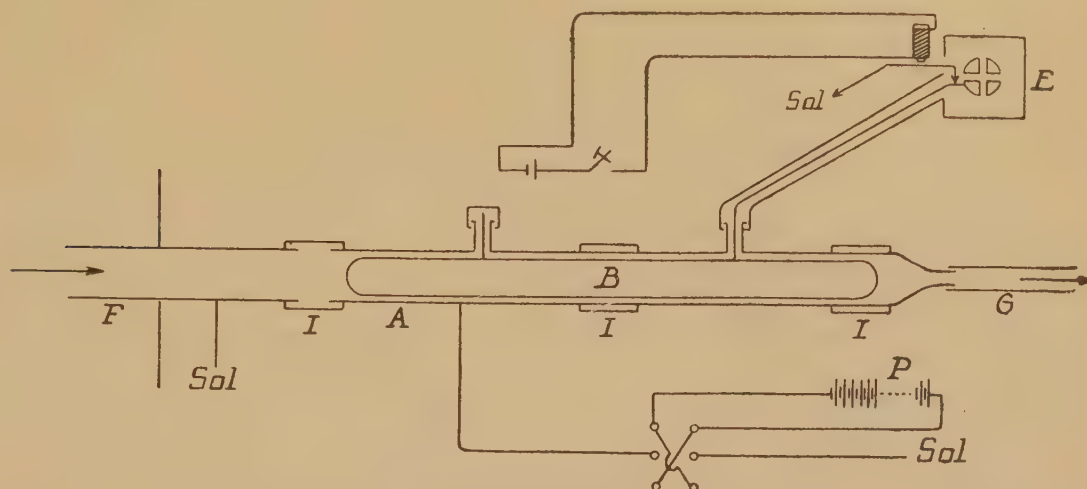


Fig. 1. — Schéma de l'appareil compteur d'ions.

La condition à satisfaire pour capter tous les ions de mobilité égale ou supérieure à la mobilité k est donnée par :

$$D/VC \leq 4\pi k \quad (1)$$

où D représente le débit d'air en $\text{cm}^3/\text{sec.}$, V le potentiel minimum d'extraction en volts, et C la capacité en centimètres du condensateur cylindrique.

Cette condition appliquée à l'appareil que nous avons utilisé pour mesurer le nombre de gros ions ($C = 177$ centimètres, $V = 300$ volts, $k = 0,0003$) ⁽¹⁾ donne pour valeur extrême de D $200 \text{ cm}^3/\text{sec.}$ De même pour les petits ions ($C = 10,4$ cm., $V = 20$ volts, $k = 1,0$) ⁽²⁾, D ne doit pas dépasser $2,6 \text{ lit./sec.}$

Dans l'appareil pour les petits ions, un certain nombre de gros ions sont captés. En désignant par i' l'intensité du courant due aux petits ions, par i celle mesurée par l'électromètre, par N le nombre spécifique et par K la mobilité des gros ions, par n et k ceux des petits ions, on a très sensiblement :

$$\begin{aligned} i' &= i(1 - Ne \cdot 4\pi KCV / ne \cdot 4\pi kCV) \\ &= i(1 - NK / nk). \end{aligned}$$

⁽¹⁾ On trouvera une discussion complète dans le chapitre III (Conductibilité et Ionisation atmosphériques, par Ch. MAURAIN), du *Traité d'Electricité atmosphérique et tellurique*, publié sous la direction de E. MATHIAS, Paris, Les Presses Universitaires de France, 1924, et dans le chapitre II de : *L'Electricité atmosphérique*, par B. CHAUVÉAU, Paris, Doin, 1924.

⁽²⁾ La mobilité des gros ions diminue de $0,0008$ pour une humidité relative de 4 , à $0,0003$ pour une humidité relative de 100 : POLLOCK, *Phil. Mag.*, Avril 1915, p. 514.

⁽³⁾ La mobilité des petits ions atmosphériques est inférieure à celle des petits ions du laboratoire.

Ainsi pour $N = 100 n$, 3 % du courant mesuré par l'électromètre est dû aux gros ions, et il y a lieu de faire une correction ⁽¹⁾.

Notre montage est représenté (fig. 1). Le condensateur cylindrique se modèle sur celui de Langvin et Moulin ⁽²⁾. Le champ électrique nécessaire pour l'extraction des ions est fourni par une batterie de piles Féry. Le courant d'air est aspiré de l'atmosphère à travers le tuyau en fer F à l'aide d'un compteur à gaz, qui, à son tour, est relié au condensateur par le tuyau en caoutchouc G. Le compteur, mû par un moteur électrique, débite 15,170 lit. par tour : à l'aide d'un rhéostat et de poulies, on peut faire varier la vitesse du compteur de manière à avoir un débit d'air convenable. L'électromètre, de modèle Curie-Debierne, donne une déviation de 800 millimètres pour 1 volt.

On assure l'isolement du système : électrode — liaisons — électromètre — clef de mise au sol, en utilisant des anneaux de garde et des écrans électrostatiques, mis au sol. Le cylindre extérieur est isolé au moyen des anneaux d'ébonite, I, I, I.

Pour empêcher les fils d'araignées d'entrer dans le système cylindrique, on bouche avec un morceau de toile métallique le tuyau communiquant avec l'atmosphère. Ce tuyau a été, en outre, couvert intérieurement d'une légère couche de vaseline pour capter les particules de suie qui, au début, gênaient les mesures.

Étalonnages. — On a comparé par la méthode d'induction la capacité du système cylindrique avec celle d'un condensateur étalon secondaire Moulin-Beaudouin, de 30 U.E.S. L'échelle de l'électromètre a été ensuite calibrée en quantités d'électricité en utilisant deux piles Daniell débitant sur une résistance de 20.000 ohms. On s'est servi d'un électromètre Wulf pour l'étalonnage des piles Féry.

Après chaque nettoyage, on a répété l'étalonnage du condensateur cylindrique. Les autres étalonnages ont été fréquemment répétés.

Précision des mesures. — dq/dt étant l'intensité du courant mesurée par l'électromètre, D le débit d'air et e la charge élémentaire, la densité ionique N est donnée par :

$$N = \frac{dq/dt}{De}.$$

Pour une concentration de l'ordre de 17.000 gros ions par cm^3 , le spot parcourt 60 millimètres en

⁽¹⁾ Cette correction est très importante dans le cas de l'appareil d'Ebert, surtout si on admet l'existence des ions intermédiaires. Dans un modèle de l'appareil d'Ebert, tous les ions de mobilité supérieure à 0,07 sont captés, et dans un deuxième modèle, tous les ions de mobilité supérieure à 0,04 sont captés. Admettons pour l'air de la campagne la distribution d'ions que l'on peut déduire des résultats de Gockel à Fribourg (500 petits ions, 600 ions intermédiaires, et 1.300 gros ions) et calculons les corrections à apporter aux mesures faites avec les appareils d'Ebert, en nous servant de la formule :

$$n' = n - Nk_n/k - mk_m/k,$$

où n' est le nombre vrai de petits ions, n le nombre fictif, k la mobilité critique telle que tous les ions de cette mobilité sont captés, et N et k_n , m et k_m sont respectivement relatifs aux gros ions et aux ions intermédiaires. Le premier appareil donnera pour le nombre spécifique des petits ions une valeur dépassant la vraie valeur de 35 % : si on se sert du deuxième modèle, l'excès sera 60 %. Comme la plupart des mesures sur les petits ions ont été faites avec des appareils d'Ebert, et qu'on n'a pas fait de correction, il semble que nous devons réduire les chiffres obtenus de 50 % environ pour avoir le nombre vrai de petits ions présents dans l'atmosphère.

La correction est de l'ordre de 1 % si on fait des mesures avec l'appareil de Gerdien : elle est donc négligeable.

⁽²⁾ Pour les détails, voir *Le Radium*, 4 (1907), p. 218.

1 minute : en appréciant le $1/10^e$ de millimètre et le $1/5^e$ de seconde, on a une précision de 1 % dans la mesure de dq/dt . L'échelle de l'électromètre étant calibrée au $1/100^e$ près, et D étant déterminé avec une précision du même ordre, l'erreur relative maximum sur N est de 3 %. Vue la nature variable de N, cette précision est amplement suffisante.

Nous avons passé plusieurs mois à mettre au point et à vérifier soigneusement toutes les pièces de l'appareil. Avant toute mesure, une série d'expériences de contrôle était exécutée avec des courants électriques d'intensité constante pour étudier l'influence du tuyau communiquant avec l'atmosphère, le temps que met le condensateur à se polariser quand le sens du champ électrique a été changé, et la constance du courant d'air débité par le compteur en régime. Lors des observations, l'ordre de grandeur de la fuite fournit un contrôle très sûr.

Marche d'une série d'observations. — Au préalable, on laisse tourner le compteur pendant une dizaine de minutes, pour que le moteur s'échauffe et atteigne son régime, et pour avoir de l'air frais dans le condensateur. Puis on arrête le compteur, et on détermine la fuite positive et la fuite négative. On met le compteur en marche à nouveau, et on détermine sa vitesse de rotation. On isole la paire de quadrants utiles de l'électromètre, et l'aiguille ayant dévié pendant une quinzaine de secondes, on note le temps mis par le spot à parcourir un certain nombre de divisions de l'échelle. En principe, nous avons employé des intervalles de 1 à 3 minutes pour les gros ions, et de 5 minutes pour les petits ions. Ayant changé le sens du champ électrique, on fait de la même manière une observation sur les ions de l'autre signe. Après une série d'observations, on arrête le moteur et on détermine à nouveau les fuites. Signalons que presque toujours la fuite négative était plus grande que la fuite positive.

Chaque série d'observations a, en principe, une durée de 30 minutes, et ce sont les moyennes demi-horaires que nous avons employées pour les calculs ultérieurs, comme souvent les mesures particulières n'ont pas de signification très nette par suite du caractère instable de l'ionisation.

Observations pyréliométriques. — Afin d'étudier l'influence des gros ions sur l'absorption des rayons solaires, nous avons fait, sur les conseils de M. Maurain, des observations pyréliométriques au sommet et en bas de la Tour Eiffel, et des mesures croisées sur les gros ions. Pour les observations sur la radiation solaire, nous nous sommes servis de l'actinomètre de Michelson.

Cet appareil consiste en une lamelle de platine couverte d'une couche de cuivre par galvanoplastie. Le platine est large de 2 millimètres, long de 18 millimètres et épais de 0,025 mm. L'épaisseur du cuivre est de 0,03 mm. Le platine est prolongé par une lamelle d'aluminium sur laquelle repose un miroir qui éclaire un fil de quartz, dont l'image est visée par un objectif micrométrique. La radiation tombe sur la lame bimétallique en passant à travers une ouverture, que l'on peut fermer à volonté. Par suite des échauffements inégaux, la lame se courbe et le miroir et l'image du fil de quartz se déplacent : le déplacement de l'image sur l'échelle micrométrique sert à mesurer la quantité de radiation reçue.

Lors d'une observation, on oriente l'appareil de manière à recevoir normalement les rayons solaires. On fait des lectures alternatives à l'ombre et au soleil toutes les 20 secondes, et on déduit de ces lectures la quantité de radiation reçue en se servant de la courbe d'étalonnage de l'appareil.

L'instrument que nous avons employé a été étalonné par M. Brazier, au Parc Saint-Maur,

par comparaison avec un pyréliomètre Abbot. La précision des mesures ne dépasse pas 3 %, sauf dans les conditions les plus favorables. Lors de nos observations au sommet de la Tour Eiffel, la précision était généralement faible à cause des vibrations dues aux coups de vent. Pour diminuer cette source d'erreurs, nous avons multiplié le nombre des observations.

CHAPITRE III

RÉSULTATS DES OBSERVATIONS

I. — RÉSULTATS GÉNÉRAUX

1) Nous reproduisons d'abord quelques graphiques typiques qui montrent la variation du nombre spécifique des gros ions à des instants successifs rapprochés.

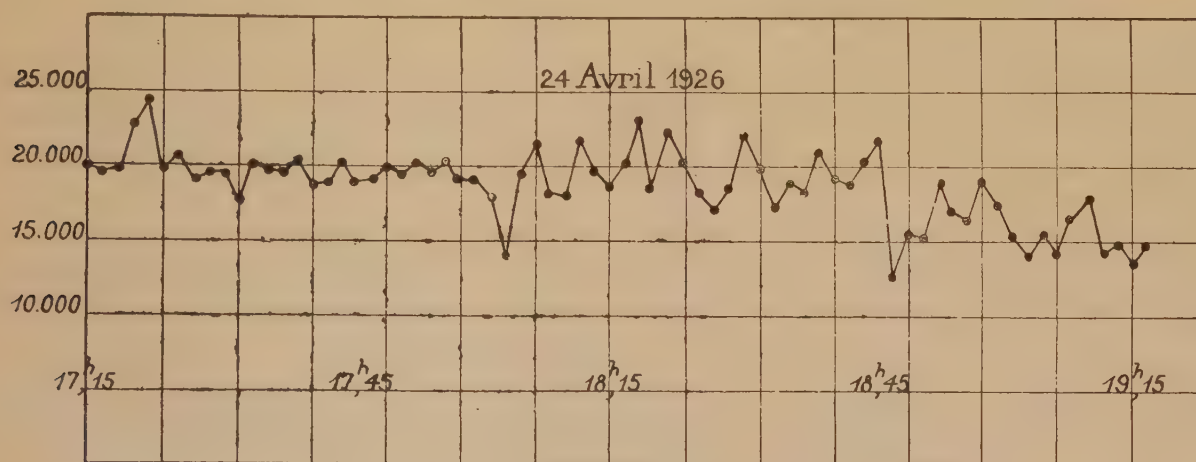


Fig. 2. — Variation irrégulière normale de N.

Les courbes présentent le plus souvent un aspect dentelé (fig. 2). Les variations irrégulières sont plus accusées pendant la pluie (fig. 3) : elles sont moins marquées et tendent à disparaître par beau temps (fig. 4) et la nuit (1^{re} partie des courbes, fig. 5). L'allure générale de ces courbes est celle des courbes enregistrées du champ électrique obtenues dans des conditions météorologiques semblables (¹).

En général, il y a de nombreuses oscillations au thermomètre et à l'hygromètre les jours des plus grandes variations irrégulières des gros ions, mais nous n'avons pas trouvé de parallélisme marqué entre les variations du nombre d'ions d'une part, et les variations de ces éléments météo-

(¹) Cette ressemblance entre la variation du nombre des gros ions et la variation du champ a été déjà signalée pour l'air d'une pièce : NOLAN, *P. R. I. A.*, 37 (1925), pp. 10-11.

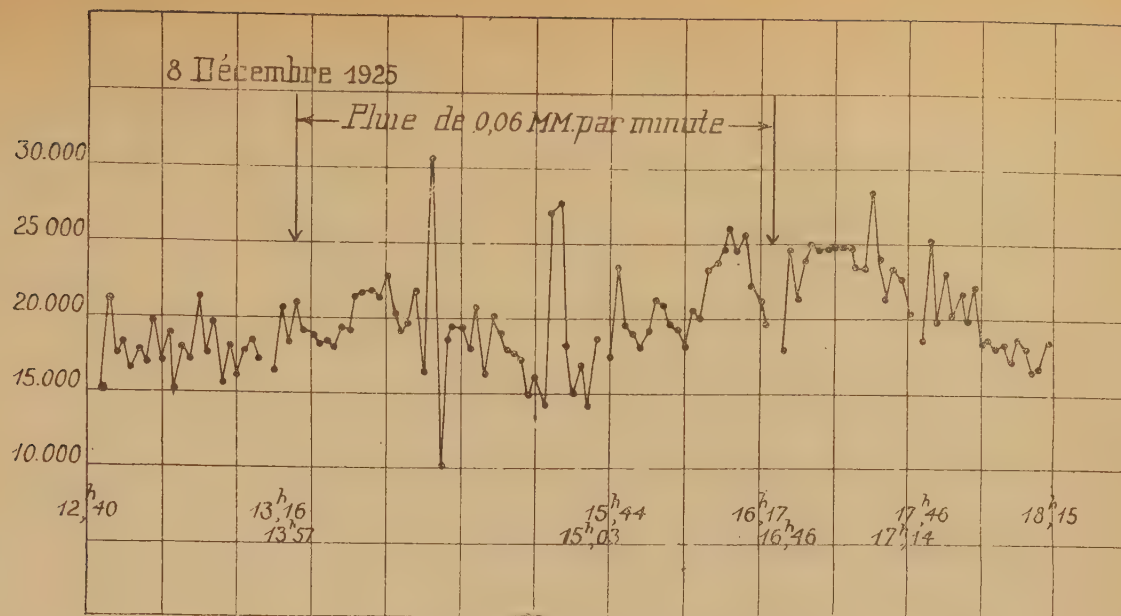


Fig. 3. — Variation irrégulière de N pendant la pluie.

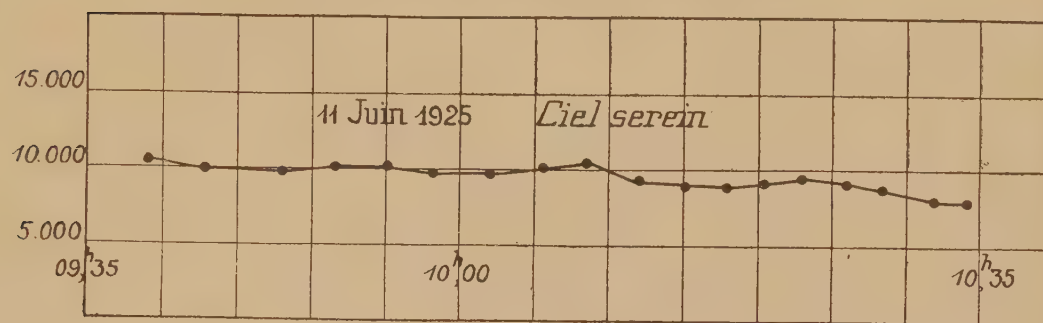


Fig. 4. — Variation de N par beau temps.

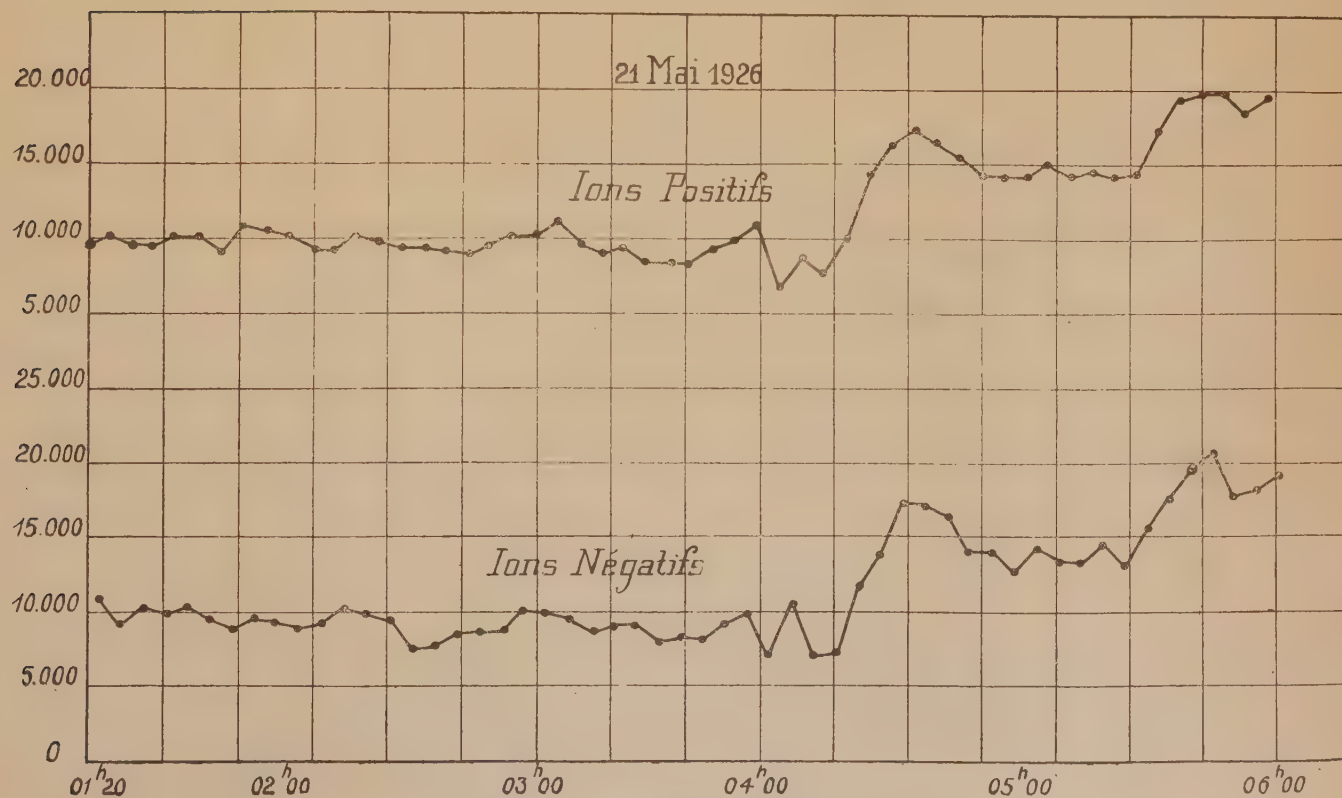


Fig. 5 — Variation de N pendant la nuit.

rologiques de l'autre. La cause des variations accidentelles des gros ions serait complexe ; nos résultats montrent que le nombre spécifique des gros ions est une fonction de plusieurs variables indépendantes. La vitesse de variation de la température dans le voisinage du sol jouerait peut-être le

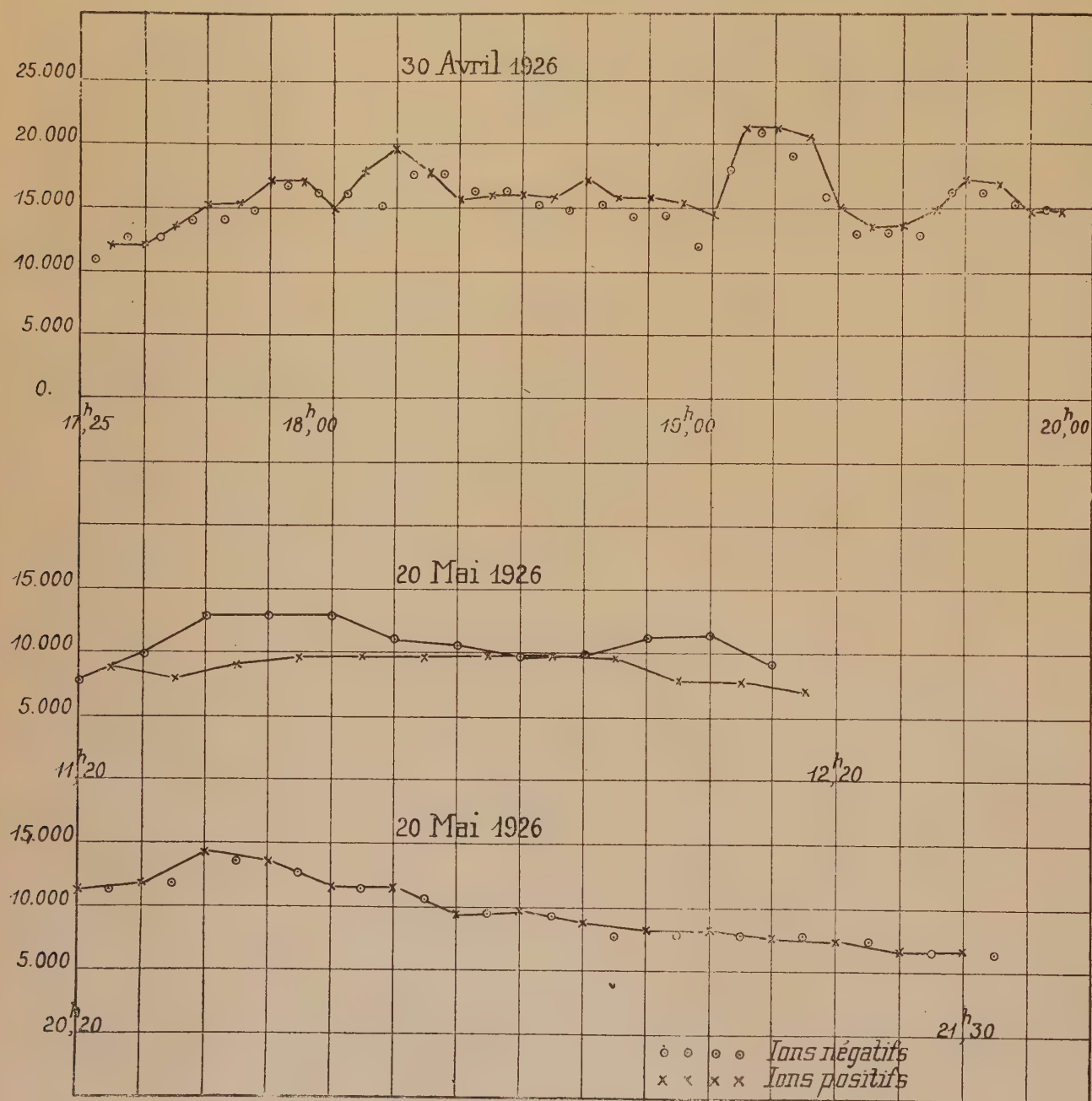


Fig. 6. — Variations simultanées des ions positifs et négatifs.

rôle le plus important en produisant des courants de convection, et il y a une analogie frappante entre les discontinuités observées dans le cas des gros ions, et dans le cas des nuages de fumée qui montent du bout d'une cigarette qui brûle. Remarquons que les gaz issus des cheminées d'usines

constituent une des principales sources des gros ions dans les villes, et ces usines ne fonctionnent très souvent que d'une façon discontinue.

Les courbes obtenues en faisant des observations tour à tour sur les ions positifs et négatifs sont de trois sortes. Le plus souvent, le nombre d'ions positifs tend à se confondre avec le nombre d'ions négatifs, avec parfois des excès momentanés des ions de l'un ou de l'autre signe. Moins souvent, il y a un excès net et assez constant des ions négatifs. Plus rarement les courbes ne révèlent aucune différence appréciable entre les ions des deux signes (voir figs. 5, 6 et 7).

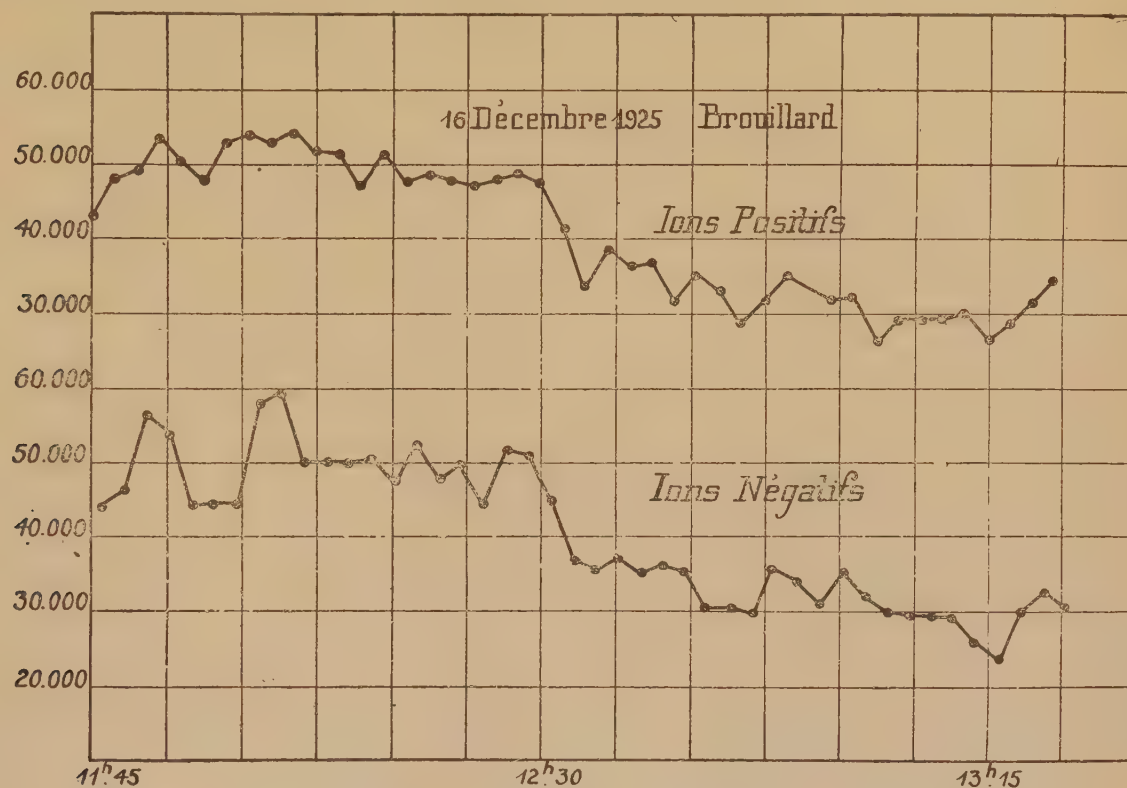


Fig. 7. — Variation de N par temps brumeux.

Les plus grandes valeurs de la concentration sont observées par temps brumeux (cf. fig. 7). Le champ électrique tend à augmenter dans les mêmes conditions ⁽¹⁾.

2) Dans le quartier du Champ de Mars, la teneur en ions de toute sorte a varié de 1.600 par cm^3 à 33.500, avec une moyenne de 9.037 pour les ions +, et 9.197 pour les ions —. Dans le quartier du Val-de-Grâce, les valeurs limites ont été comprises entre 3.600 et 80.000, les moyennes étant respectivement 16.714 (ions +) et 16.697 (ions —). Dans les deux séries de mesures, les valeurs minima ont été observées vers 16^h par beau temps, et les valeurs maxima le matin par brouillard épais. 400 mesures sur les petits ions dans la deuxième station ont donné des valeurs extrêmes de 0 et 224, avec des moyennes de 86 (ions +) et 70 (ions —) ; il en résulte que la concentration moyenne des gros ions positifs dans ce quartier à une hauteur de 20 mètres au-dessus du sol est de 16.628, tandis que celle des gros ions négatifs est identique, 16.627.

⁽¹⁾ Chap. I (Le champ électrique de l'atmosphère, par R. DONGIER), p. 59, dans le *Traité d'Electricité*, publiée sous la direction de E. MATHIAS,

Le nombre des petits ions + est supérieur au nombre des petits ions, — le rapport entre les deux étant 1,23. Cet excès des ions + sur les ions — a été constaté par presque tous les observateurs, la moyenne des observations sur terre donnant 1,23 pour le rapport entre le nombre des ions des deux signes ⁽¹⁾. A. S. Eve ⁽²⁾ explique l'excès positif par une diffusion vers les poussières en suspension dans l'atmosphère, plus rapide pour les petits ions — que pour les petits ions +. Il a vérifié expérimentalement l'existence de cet excès en ionisant directement l'air par une substance radioactive.

L'excès négatif que nous trouvons à la station 1 pour les charges électriques de l'air, et l'excès positif faible ou nul à la station 2 correspondraient à un phénomène réel, et seraient une confirmation des résultats de Norinder sur la variation du champ électrique dans le voisinage immédiat du sol. D'après les résultats de Norinder, le champ augmente dans les couches comprises entre 75 centimètres et 5 mètres au-dessus du sol. L'accroissement est, en moyenne, de 3,25 v./m. par mètre pour la saison correspondant à nos premières mesures ⁽³⁾. En mettant ce chiffre dans l'équation de Poisson : $\frac{d^2V}{dz^2} = -4\pi\rho$, nous trouvons un excès moyen de 180 ions négatifs par cm³ dans la couche considérée. Nos propres résultats donnent un excès de 160 ions négatifs pour l'air pris à 2 mètres au-dessus du sol.

Norinder explique cet excès négatif de la manière suivante ⁽⁴⁾. Les poussières qui portent des charges électriques subissent l'action de la pesanteur et celle du champ électrique. Dans le cas des particules positives, les deux actions s'ajoutent : pour les particules négatives, elles se retranchent. Les particules positives, soumises à deux actions de même sens, tombent plus vite que les particules négatives, soumises à des actions de sens contraires. Les particules négatives finissent donc par se trouver en excès dans la couche considérée.

L'excès positif faible ou nul à la deuxième station correspondrait de même à une diminution faible ou nulle du champ à la hauteur où ces mesures étaient faites.

Réduction faite pour une variation saisonnière, la teneur en gros ions de l'air de la station 2 dépasse toujours celle de l'air de la station 1 d'au moins 50 %. En admettant, avec Langevin, que le nombre spécifique de gros ions est une indication du degré d'impureté de l'atmosphère, nous concluons que l'air du quartier du Val-de-Grâce est presque deux fois plus impur que l'air du quartier du Champ de Mars. Des observations sur la visibilité confirment cette conclusion. Le 16 décembre 1925, lors d'un brouillard très épais, la visibilité à 15^h à la station 2 était entre 150 et 200 mètres : à la station 1, elle était de 300 mètres ⁽⁵⁾.

La différence des concentrations dans les deux stations s'explique en partie par la plus grande densité de la population du quartier du Val-de-Grâce. En outre, il y avait trois sources puissantes de gros ions dans un rayon de 300 mètres de l'endroit où la deuxième série de mesures étaient exécutées, tandis qu'au quartier du Champ de Mars la cheminée d'usine la plus proche était distante de 400 mètres. Notons aussi que la station 1 se trouve à l'ouest de la ville et la station 2 vers l'est, et que le vent dominant à Paris est un vent d'Ouest.

⁽¹⁾ Chap. III (Conductibilité et Ionisation atmosphériques, par Ch. MAURAIN), p. 127, dans le *Traité d'Electricité*, publié sous la direction de E. MATHIAS.

⁽²⁾ *Phil. Mag.*, **19** (1910), p. 657.

⁽³⁾ V. R. DONGIER, *loc. cit.*, p. 74.

⁽⁴⁾ V. R. DONGIER, *loc. cit.*, p. 75.

⁽⁵⁾ Nous avons fait les observations à 15 minutes d'intervalle au ras du sol, en nous servant des poteaux de gaz comme repères.

Les mesures faites en 1905-7 par Langevin et Moulin donnent approximativement 7.500 gros ions par cm^3 et 150 petits ions pour l'air de Paris ⁽¹⁾. Nos mesures, faites dans les mêmes quartiers que celles de Langevin et Moulin, indiquent que le nombre de gros ions s'est doublé depuis 1907, tandis que le nombre de petits ions est diminué de moitié, ce qui signifie que l'air de Paris est devenu deux fois plus impur ou plus opaque dans les vingt dernières années. Cette conclusion semble être confirmée par une statistique de M. Besson du nombre des brouillards constatés au centre de Paris depuis 1895. Pour les deux saisons de 1905 à 1907, le nombre de jours de brouillard était 37 et 55 ; pour la période 1924-6, les nombres étaient 84 et 76.

II. — SOURCES DES GROS IONS EN VILLE

La principale source des gros ions en ville serait la combustion qui a lieu dans les cheminées des usines.

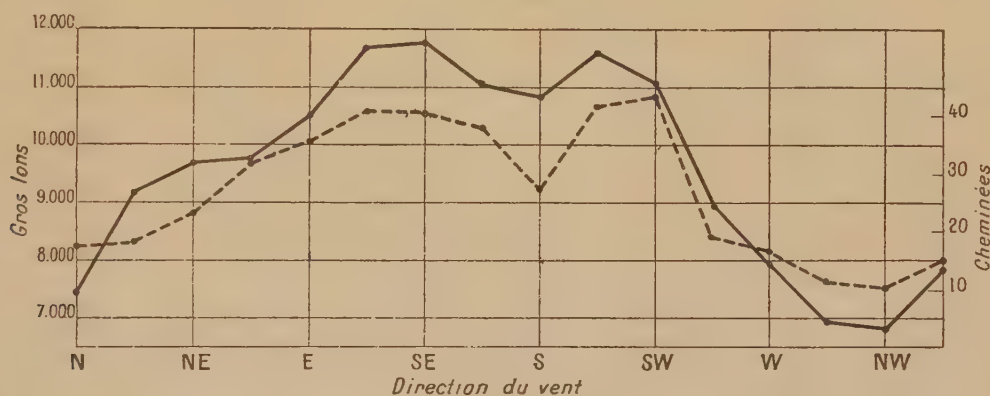


Fig. 8. — Relation entre N et le nombre de cheminées d'usines.

La figure 8, construite d'après les observations de la première station, montre la relation intime qui existe entre le nombre de gros ions d'une part, et la répartition des cheminées d'usines de l'autre. La courbe en traits pleins représente la concentration des ions suivant les différentes directions du vent, celle en pointillé la répartition des usines dans les mêmes directions. Pour établir le graphique en traits pleins, nous avons analysé les courbes enregistrées de l'anémo-cinémographe de l'Office national météorologique et réparti le nombre de gros ions suivant les directions du vent à l'heure des mesures, tout en attachant au nombre des gros ions un poids proportionnel à la durée du vent. Le graphique en pointillé a été construit en utilisant un plan des usines de Paris ⁽²⁾. Comme ce plan omet les usines de la banlieue, nous n'avons considéré que les usines dans un rayon de 4 kilomètres du lieu des observations. Ayant construit une rose des vents, nous avons compté le nombre d'usines dans chaque secteur, tout en donnant à chaque cheminée un poids proportionnel au carré de sa distance au lieu des observations.

Une étude analogue, mais moins détaillée, pour la deuxième station, donne des concentrations

⁽¹⁾ Nous avons remplacé l'ancienne valeur de e ($3,4 \cdot 10^{-10}$ U.E.S.), utilisée par Langevin et Moulin dans leurs calculs, par celle admise aujourd'hui ($4,8 \cdot 10^{-10}$ U.E.S.).

⁽²⁾ *La Nature*, Paris, 10 nov. 1923, p. 146

maxima des gros ions dans la direction de la cheminée de l'usine chimique Comar (située à 100 mètres de l'Institut de Physique du Globe), de la cheminée de l'Institut de Chimie Appliquée (à 250 mètres) et de la gare du Luxembourg (à 300 mètres). Il n'y a pas de maximum dans la direction de l'Institut du Radium de M^{me} Curie (à 200 mètres). Les petites cheminées du Restaurant Universitaire se trouvent dans cette direction aussi (à 50 mètres) : leur influence étant relativement négligeable, il semble que le rôle joué par les feux domestiques serait faible devant celui joué par les grandes cheminées d'usines.

Dans le quartier du Champ de Mars, où l'air étudié était aspiré directement de la rue, l'influence du gaz d'échappement des automobiles, surtout des camions lourds, se faisait sentir comme source de gros ions. Souvent le passage d'une automobile était marqué par une hausse de 20 % dans le nombre de gros ions. Exceptionnellement la hausse était plus accusée, de l'ordre de 100 %.

III. — VARIATIONS PÉRIODIQUES DES GROS IONS

1. **Variation diurne.** — Nos observations de la seconde station mettent en évidence l'existence d'une variation diurne du nombre de gros ions. Nous reproduisons (fig. 9) les moyennes horaires

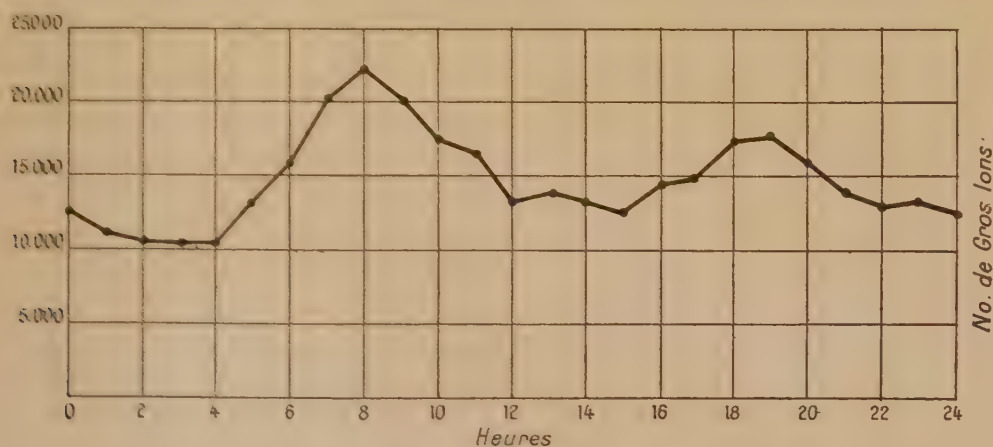


Fig. 9. — Variation diurne de N.

obtenues en utilisant toutes les mesures de cette station, exception faite de 2 jours de brouillard très épais et de 2 jours de pluie intense.

La variation diurne est caractérisée par une oscillation double très nette. Le premier maximum se produit entre 7^h et 9^h, et le deuxième entre 18^h et 20^h. Un des minima est voisin de 4^h, et l'autre se produit vers 13^h. Signalons, en outre, l'existence d'un faible maximum vers 13^h ⁽¹⁾. L'amplitude de la variation est telle que le nombre de gros ions peut s'écarter à la valeur moyenne diurne dans le rapport de 1 à 1,5 au cours des 24^h. L'amplitude est plus grande par beau temps que par ciel couvert, et la marche diurne ressort plus nettement des courbes obtenues les belles journées.

⁽¹⁾ D'après CHAPPEAU. *L'Electricité, atmosphérique*, II, p. 106, il y aurait une oscillation secondaire normale vers la même heure dans le cas du champ électrique.

Nous reproduisons (fig. 10) une de ces courbes. Chaque point du graphique représente la moyenne d'une vingtaine de mesures.

L'allure générale de la courbe qui représente la variation diurne des gros ions est celle des courbes enregistrées du champ électrique en ville, et le nombre de poussières sèches à Londres suit une variation diurne analogue ⁽¹⁾. Il est fort probable que la variation diurne des gros ions, du champ électrique et des poussières sèches est due à des causes communes.

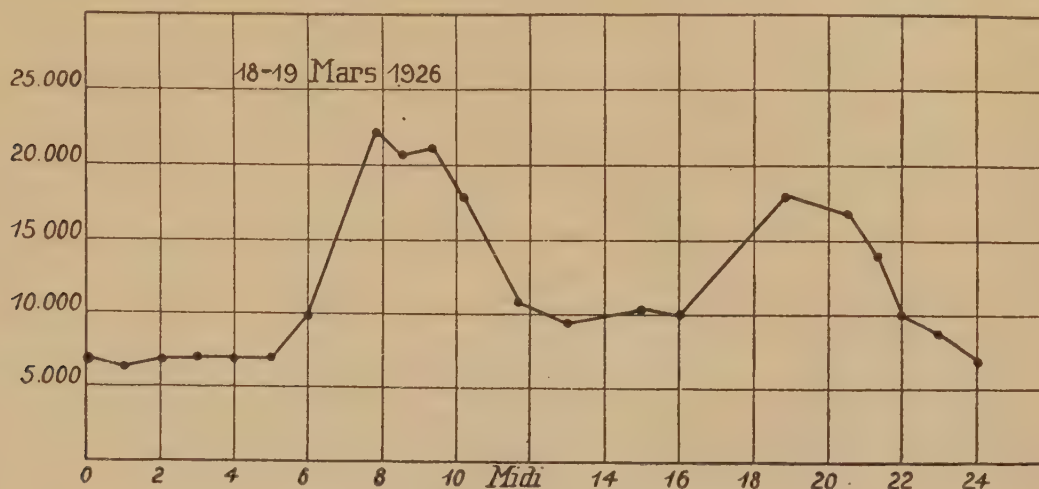


Fig. 10. — Variation diurne de N par beau temps.

Nous avons cherché dans la variation diurne des principaux éléments météorologiques une explication de la marche diurne des gros ions, mais l'étude n'a rien donné sauf l'impression que la variation doit être en relation avec les courants ascendants de l'atmosphère ou les courants de convection. D'après M. Brazier, la seule méthode pratique trouvée jusqu'ici pour étudier les courants de convection est fournie par l'examen de $\frac{d\theta}{dt}$, la vitesse de variation de la température de l'air. Une étude, pas encore terminée, de la variation de $\frac{d\theta}{dt}$ au cours de la journée indique déjà que le nombre spécifique des gros ions (N) serait une fonction de la valeur absolue de $\frac{d\theta}{dt}$, et que la variation diurne de N pourrait s'expliquer en grande partie par la variation diurne de $\left| \frac{d\theta}{dt} \right|$.

A l'appui de cette façon de voir, nous reproduisons (fig. 11) les variations diurnes de N et de $\left| \frac{d\theta}{dt} \right|$ pour le 20-21 mai 1926. Vue la difficulté d'évaluer avec précision les valeurs de $\left| \frac{d\theta}{dt} \right|$, le parallélisme entre les deux courbes est frappant.

A priori, on peut prévoir les grandes lignes d'une relation entre N et $\left| \frac{d\theta}{dt} \right|$. Une variation de température à la surface de la terre a une répercussion sur l'air dans le voisinage et provoque des courants de convection. Plus la variation de température est rapide, plus sont grands les remous, et plus sont nombreuses les poussières de toute sorte soulevées et introduites en suspension dans l'atmos-

(1) Cf. les courbes, p. 29, *Ninth Report on Atm. Pollution*.

phère. ⁽¹⁾ Quand la température monte, $\frac{d\theta}{dt}$ est + et les courants de convection provoqués ont un sens déterminé de circulation ⁽²⁾. Quand la température baisse, $\frac{d\theta}{dt}$ devient négatif, ce qui ne change que le sens de rotation des courants de convection, sans diminuer leur grandeur, et par conséquent

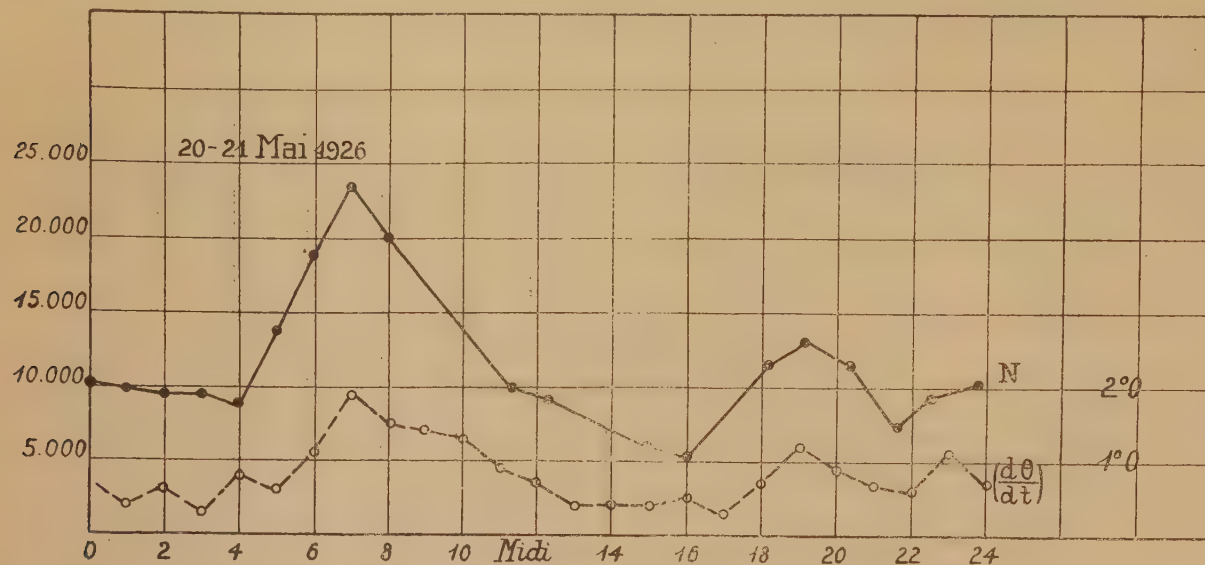


Fig. 11. — Parallélisme entre les variations diurnes de N et de $\left| \frac{d\theta}{dt} \right|$.

sans diminuer le nombre de poussières soulevées tant que la valeur absolue de $\frac{d\theta}{dt}$ (—) est égale à celle de $\frac{d\theta}{dt}$ (+). Il y aura donc deux valeurs maxima du nombre de poussières au cours des 24h, correspondant aux valeurs maxima de $\frac{d\theta}{dt}$ (+) et de $\frac{d\theta}{dt}$ (—). Ces deux maxima encadreront naturelle-

⁽¹⁾ Comme le gros ion mettra 10^8 secondes environ pour tomber de 1 centimètre sous l'action de la pesanteur, l'intensité des courants nécessaires pour soulever les gros ions sera très faible.

⁽²⁾ Pour voir le sens de rotation, se rapporter à la figure 12, qui représente une coupe de la terre suivant le plan de l'équateur, vu du pôle nord. (Dans ce plan, la force déviante due à la rotation de la terre est nulle). Correspondant aux températures extrêmes de la journée, il y aura à la surface de la terre un centre chaud et un centre froid. Au-dessus du centre chaud, l'air se dilate, et à une certaine hauteur il se repand sur les méridiens plus éloignés du soleil. Au-dessus du centre froid, les couches inférieures se contractent et l'air afflue de tous côtés, surtout par en haut. Donc à une certaine hauteur, il y aura un mouvement général de l'air du centre chaud vers le centre froid. Au ras du sol, l'air se déplacera en sens inverse. Entre la couche supérieure et la couche inférieure, des mouvements tourbillonnaires, dont le sens de rotation est indiqué par les flèches, prendront naissance. Les courants de convection dus aux actions locales de la température auront le même sens de rotation que ces tourbillons, comme, en général, la température du sol monte au fur et à mesure que l'on s'approche du centre chaud. L'influence de la rotation de la terre serait de décaler indirectement la position du centre froid : en effet, l'air chaud, qui passe par la droite de la figure, se déplace relativement à la terre plus vite que l'air qui passe par la gauche, et il ne sera pas assez refroidi pour descendre au sol au moment où il se trouve verticalement au-dessus du centre froid. Ayant dépassé le centre froid, il descendra, et, purifié par son trajet, ne renfermera que peu de poussières. Le nombre de poussières serait donc un minimum avant le lever du soleil. Il se peut que nous avons là une explication du minimum de 4h.

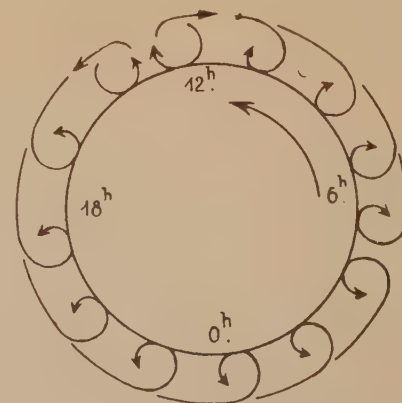


Fig. 12. — Sens de rotation des courants de convection.

ment deux minima, dont un se produira vers la fin de la nuit. Il y aura aussi un faible maximum entre 13^h et 14^h, quand le maximum de la température se produit : à ce moment, deux courants de sens opposés seront en présence, et bien qu'ils soient de faible intensité ($\frac{d\theta}{dt}$ étant faible à cette heure), ils ajouteront leurs forces pour soulever les poussières ⁽¹⁾.

Nous n'insistons pas sur les rôles que joueront la nébulosité, l'humidité, et la nature du terrain entourant la station où on fait les observations : tous ces facteurs auront une répercussion directe sur $\frac{d\theta}{dt}$ (et par conséquent une répercussion indirecte sur N) par suite de leur influence soit sur la transparence de l'atmosphère, soit sur le pouvoir émissif du sol.

En résumé, cette théorie expliquera les caractères essentiels de la variation diurne du nombre de gros ions et de poussières sèches. Les variations de la teneur en gros ions de l'air seraient la principale cause des variations du champ électrique ⁽²⁾. La même théorie expliquera donc la variation diurne du champ électrique. La plupart des variations accidentelles des trois éléments s'expliqueront aussi par cette théorie.

2. **Variation saisonnière.** — Nos observations de la seconde station, surtout celles effectuées par beau temps, révèlent l'existence d'une variation saisonnière du nombre de gros ions. Cette variation est représentée (fig. 13). La courbe en traits pleins, tracées d'après les observations très continues de

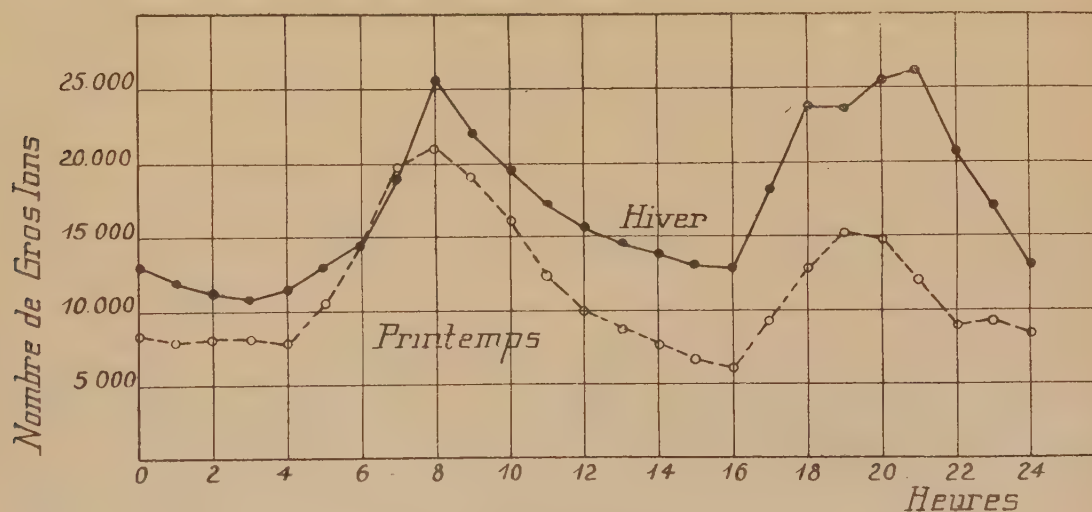


Fig. 13. — Variation diurne saisonnière de N.

4 jours de beau temps, se rapporte à la saison d'hiver, et la courbe en pointillé, tracée d'après les observations de 3 jours de beau temps, se rapporte au printemps. Les moyennes horaires de toutes

(1) Pour s'en rendre compte, considérer ce qui se passe dans un verre contenant de l'eau et de petites particules de craie, quand on met l'eau en rotation. Une fois le régime d'équilibre dynamique établi, l'eau descend le long des côtés du verre pour monter au milieu, entraînant les poussières de craie jusqu'à une certaine hauteur. Ce phénomène est l'analogue de celui décrit dans le texte. C'est le phénomène inverse qui aura lieu vers la fin de la nuit, quand les deux courants de sens contraires auront un sens de rotation tel que l'air descend de haut en bas, ne renfermant que peu de poussières.

(2) En général, quand le nombre de gros ions augmente, le nombre de petits ions et la conductibilité diminuent, tandis que la valeur du champ augmente.

les mesures donnent des courbes plus accidentées, mais de même allure générale. La moyenne diurne varie de 17.000 en hiver à 12.000 au printemps, ce qui indique l'existence d'une variation annuelle de même amplitude que celle trouvée couramment pour le champ électrique terrestre. Le maximum du soir, plus important en hiver que le maximum du matin, s'affaiblit à mesure que la température monte, et au printemps c'est le maximum du matin qui domine. Quelque chose d'analogue a lieu couramment dans le cas du champ électrique.

La variation saisonnière serait probablement due, pour la plus grande part, à la variation saisonnière de l'humidité relative.

IV. — LES GROS IONS ET LES ÉLÉMENTS MÉTÉOROLOGIQUES

Une étude statistique des éléments météorologiques et des gros ions a donné des résultats négatifs pour la pression barométrique et l'humidité absolue, et des résultats positifs pour les éléments qui suivent.

1. **Température.** — Le tableau I résume les résultats obtenus pour la deuxième station. Dans la 3^e et la 4^e ligne figurent les produits $NT^{\frac{1}{4}}$ et $NT^{\frac{3}{8}}$, N désignant le nombre spécifique de gros ion et T la température absolue. Les produits sont sensiblement constants ; le nombre de gros ions serait donc une fonction de la température absolue.

TABLEAU I

Température.....	— 50,0 à 00,0	00,1 à 50,0	50,1 à 100,0	100,1 à 150,0
N.....	16.836	16.700	16.628	16.516
$NT^{\frac{1}{4}} \times 10^{-1}$	6.829	6.803	6.806	6.790
$NT^{\frac{3}{8}} \times 10^{-2}$	1.383	1.382	1.384	1.384

Nous pouvons établir une relation théorique entre N et T en partant de la théorie cinétique des gaz, dont l'application à des particules qui sont grosses vis-à-vis des molécules a été justifiée par les beaux travaux de Perrin.

Soient : n le nombre d'ions de chaque signe contenu dans un cm^3 de l'air, r leur rayon et v leur vitesse quadratique moyenne. Les ions participent au mouvement d'agitation thermique de l'air et entrent fréquemment en collision ⁽¹⁾. Le nombre de collisions susceptibles de se produire entre un ion positif et n ions négatifs étant $n \cdot 4r^2\pi v\sqrt{2}$, le nombre total de collisions entre les ions de signes contraires sera :

$$(1) \quad v = n^2 \cdot 4r^2 \cdot \pi v \sqrt{2}.$$

Le coefficient de recombinaison des ions, γ , est relié à v par l'équation :

$$(2) \quad \gamma n^2 = v/a$$

⁽¹⁾ L'influence de la charge des gros ions en provoquant des collisions serait négligeable : cf. KENNEDY, *P. R. I. A.* 33 (1916), p. 67, et Sir J.-J. THOMSON, *Passage de l'électricité à travers les gaz*, Paris 1912, p. 24.

a étant une constante dont la valeur sera 1 si chaque collision est fatalement suivie d'une recombinaison (1).

Des équations (1) et (2) nous tirons :

$$(3) \quad \gamma = 4r^2\pi v\sqrt{2}/a.$$

D'après la théorie cinétique des gaz, si m_1 est la masse d'un gros ion et T la température absolue de l'air, v est égale à $\sqrt{2\alpha T/m_1}$, en désignant par α le facteur $\frac{3}{2} \frac{R}{N}$: R et N sont des constantes universelles. A l'aide de cette relation, éliminons v de l'équation (3), après avoir remplacé m_1 par $\frac{4}{3}\pi\rho r^3$, où ρ désigne la densité, supposée uniforme et constante, du gros ion. L'équation (3) devient :

$$(4) \quad \gamma = \frac{4}{a} \cdot \sqrt{\frac{r}{\rho} \cdot 3\pi\alpha T}.$$

Le coefficient de recombinaison est donc proportionnel à la racine carrée de la température absolue, ce qui explique la diminution du nombre de gros ions quand la température monte.

D'autre part, si q paires d'ions sont produites constamment par cm^3 par seconde, un régime d'équilibre s'établira quand la production égale la recombinaison. Dans ces conditions, nous aurons :

$$(5) \quad \gamma n^2 = q \quad (2).$$

En éliminant γ entre les équations (4) et (5), nous trouvons :

$$(6) \quad n^2 = q \frac{a}{4} \sqrt{\frac{\rho}{r}} \sqrt{\frac{1}{3\pi\alpha T}}$$

qui peut s'écrire, si le rayon du gros ion ne varie sensiblement pas quand la température monte ou descend :

$$(7) \quad nT^{\frac{1}{2}} = \text{const.}$$

En consultant le tableau I, on voit que l'équation (7) est assez bien vérifiée par nos résultats. Si nous adoptons la théorie de Sutherland, ce qui nous amène à écrire finalement $NT^{\frac{3}{2}} = \text{const.}$, l'accord entre nos résultats et la formule devient très bon.

2. Etat hygrométrique. — Le tableau II montre que la relation qui existe entre le nombre spécifique de gros ions et l'état hygrométrique est sensiblement linéaire. Quand l'humidité relative dépasse 90, N augmente plus rapidement que l'état hygrométrique, probablement parce qu'un état hygrométrique si élevé est généralement accompagné de pluie.

(1) En supposant les gros ions constitués d'eau liquide, et en prenant $r = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ cm.}$ (moyenne des valeurs trouvées par de Broglie et Nolan) on trouve $\gamma a = 59 \cdot 10^{-10}$ à la température de 10°C. D'après KENNEDY, *loc. cit.*, $\gamma = 14 \cdot 10^{-10}$. Par conséquent, $a = 4$, et il n'y aurait qu'une recombinaison pour 4 collisions. Remarquons que Langevin (*Ann. de Chimie et de Phys.*, 1903, 8^e série, t. 1, p. 437) a été conduit par ses calculs à la même valeur de a pour les petits ions dans l'air normal.

(2) D'après SUTHERLAND, *Le Radium*, 6, 1909, p. 348, nous devons écrire cette équation $\gamma n^{\frac{4}{3}} = q$.

TABLEAU II

Etat hygrométrique	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100
N (Champ-de-Mars)	6.740	8.050	8.700	8.900	9.640	10.440	10.610	
N (Val-de-Grâce)	9.330	10.590	11.250	14.000	15.760	17.460	18.780	23.060

Nos résultats indiquent l'importance de l'humidité pour la formation des gros ions. Mais, comme le nombre de gros ions dans les deux stations n'augmente pas dans le même rapport pour une variation donnée de l'humidité, nous concluons qu'un autre élément, présent en de plus fortes proportions à la station 2 qu'à la station 1, est nécessaire pour la formation de ces ions. Certaines expériences de Pollock, d'Aitken et de de Broglie, qui montrent que dans de l'air tout à fait pur, ni les gros ions ni les noyaux de condensation ne sont produits, indiquent que cet autre élément consiste en des poussières solides. Les noyaux d'Aitken et les gros ions seraient donc constitués d'un cœur poussiéreux, entouré d'une atmosphère d'eau liquide.

Une discussion mathématique détaillée des résultats portés dans le tableau II, faite en tenant compte des variations de N (le nombre des gros ions), k (la mobilité), T (la température) et q (la production des gros ions) correspondant à une variation donnée de l'état hygrométrique, nous a conduit à des conclusions semblables.

3. **Vitesse du vent** (tableau III). — Le nombre de gros ions varie en sens inverse de la vitesse du vent, sauf quand le vent atteint des vitesses considérables correspondant à des temps orageux. L'interprétation est que quand l'air reste tout à fait calme, les gros ions s'accumulent dans l'atmo-

TABLEAU III

Vitesse du vent en m./sec.	0,0 à 1,9	2,0 à 3,9	4,0 à 5,9	> 6,0	> 8,0
N (Champ-de-Mars)	14.470	10.500	8.240	9.090	
N (Val-de-Grâce)	23 200	18.450	14.890	14.950	17.670

sphère jusqu'à ce que la production équilibre les pertes dues à la recombinaison. Quand vient le vent, un certain nombre des gros ions sont chassés de la ville au fur et à mesure que le vent souffle plus fort. Quand le vent atteint des vitesses élevées, il est généralement accompagné par l'orage et la pluie : cette dernière étant parfois une source très puissante de gros ions, l'action du vent se trouve compensée.

Nos observations dans les deux stations ont parfaitement justifié cette interprétation.

4. **Nébulosité**. — Langevin ⁽¹⁾ a attiré l'attention sur l'importance que présentent, pour la formation des nuages inférieurs, les gros ions et les centres neutres. Gockel ⁽²⁾ a essayé de vérifier les vues de Langevin, mais il n'arrive pas à des conclusions nettes. Nos observations indiquent l'existence d'une relation déterminée, mais complexe, entre le nombre de gros ions et la nébulosité (tableau IV). Si on ne considère que les valeurs moyennes de N pour des valeurs de la nébulosité

⁽¹⁾ P. LANGEVIN, *Le Radium*, t. IV, 1907, p. 219.

⁽²⁾ *Luftelektrische Beob. im Schweizerischen Mittelland*, Zürich (1917), p. 25.

TABLEAU IV

Nébulosité	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10
N/10 ³ (Ch.-de-M.).	8,82	9,95	9,63	8,30	7,81	7,90	8,15	8,29	8,46	8,60	8,63	9,07	10,28
N/10 ³ (V.-de-G.).	17,40	18,00	16,00	13,72	13,98	13,00	12,00	12,65	13,18	13,41	15,18	17,95	19,10

inférieures à 5 d'une part, et supérieures à 5 de l'autre, on tombe sur le résultat nul de Gockel. Mais en considérant les valeurs de N, qui correspondent à chaque degré de la nébulosité, nous trouvons un nombre minimum de gros ions pour la nébulosité 5, avec une augmentation régulière de N quand la nébulosité monte de 5 à 10, ou diminue de 5 à 0.

Cette relation complexe serait due à l'influence de la nébulosité sur la transparence de l'atmosphère, qui déterminera des variations dans la valeur de $\frac{d\theta}{dt}$ au ras du sol et provoquera des courants de convection. Dans l'absence de l'effet perturbateur des courants de convection, le nombre de gros ions dans les couches baignant le sol serait proportionnel au nombre de gros ions contenus dans les couches supérieures où les nuages sont formés, et au degré de la nébulosité. Les courants de convection viendraient compliquer cette relation simple, en soulevant dans les couches basses de l'atmosphère de gros ions, dont le nombre dépendrait du degré de transparence de l'atmosphère.

Les gros ions étant de 10 à 20 fois plus nombreux dans l'air des grandes villes que dans l'air de la campagne, on peut s'attendre à une plus grande nébulosité moyenne au-dessus des villes qu'aux alentours. Cette conclusion est confirmée parfaitement par les résultats d'une étude de M. Besson ⁽¹⁾, L'influence locale d'une agglomération industrielle sur la nébulosité serait donc appréciable.

5. **Pluie.** — La valeur moyenne de N obtenue en tenant compte des résultats de 70 groupes d'observations faites pendant la pluie est supérieure de 10 % environ à la valeur moyenne correspondant à un temps sec. Parfois les variations irrégulières de N sont très accusées. Ainsi, N a monté le 3 février 1926 de 29.000 à 59.000 dans l'espace de 5 minutes pendant une pluie de 0,02 mm. par minute. Nous ne trouvons aucune relation entre la quantité de pluie tombée et le nombre de gros ions. Le plus souvent, la concentration est forte pendant les pluies fines de faible intensité. Pendant les pluies d'une durée d'une heure environ, N augmente vers la fin de la pluie et baisse quelque temps après. Quand il a plu constamment pendant plusieurs jours, on observe une diminution marquée dans le nombre de gros ions. Ce dernier résultat s'explique par l'absorption par la pluie des matières solides nécessaires pour la formation des gros ions.

Les observations pendant la neige et la grêle sont trop peu nombreuses pour que nous puissions formuler des conclusions précises.

V. — LES GROS IONS ET LA TRANSPARENCE DE L'ATMOSPHÈRE

1. **La visibilité** ⁽²⁾. — Le produit par la visibilité et du nombre de gros ions est à peu près constant (voir tableau V, où x désigne la visibilité en centimètres). Le produit de la visibilité par l'état hygrométrique serait constant également.

(1) Louis Besson, *Annuaire de la Soc. Météor. de France*, 61^e année (1913), p. 131.

(2) Les vents secs et les vents humides n'ont pas la même influence sur la visibilité. Pour des valeurs égales de l'humidité, la visibilité à Paris est meilleure dans la direction d'où vient le vent, que dans la direction où va le vent, ce qui s'explique parfaitement. L'influence du vent est en grande partie éliminée en prenant la valeur moyenne de la visibilité suivant les 4 points cardinaux.

Trois fois, par brouillard très épais, nous avons remarqué que la concentration maximum des gros ions était de 1 à 2^h en retard sur le minimum de la visibilité : dans ces conditions, des noyaux seraient formés indépendamment de toute charge électrique, et les agents ionisants de l'air mettraient de 1 à 2^h à établir l'état d'équilibre entre les centres chargés et les centres neutres ⁽¹⁾.

TABLEAU V (Station 2)

N	5.250	7.200	9.150	11.100	12.900	14.800	16.900	18.900	22.100	28.500	44.900
Vis. en km. . .	14,52	9,30	7,11	6,08	5,15	3,92	3,53	3,35	2,77	2,25	1,61
Nx. 10 ⁻⁷	762	669	652	672	664	580	597	632	612	641	722

Le produit Nx étant constant, l'extinction de la lumière par les gros ions et les centres neutres suivrait la loi de Beer, et le rayon des noyaux ne varierait qu'entre de faibles limites.

Les gros ions et les centres neutres joueraient le principal rôle dans l'obstruction de la lumière dans les couches basses de l'atmosphère. L'influence des molécules d'air, calculée d'après la formule de Lord Rayleigh sur la diffusion de la lumière par de petites particules, est faible : elle est de 6 % pour une visibilité de 4 kilomètres. De mesures photométriques faites à Londres ⁽²⁾, nous déduisons que l'obstruction due aux poussières sèches est généralement inférieure à 20 % de l'obstruction totale observée. La vapeur d'eau exerce une influence plus faible encore que les molécules de l'air ⁽³⁾. Dans la plupart des cas examinés, nous avons remarqué que, la teneur en gros ions étant faible et l'air étant presque saturé de vapeur d'eau, la visibilité était bonne.

Nous considérons plus loin la façon dont les gros ions et les centres neutres peuvent éteindre la lumière.

2. Observations pyrhéliométriques. — Les mesures au sommet de la Tour Eiffel étaient faites à une hauteur de 285 mètres, ce qui correspond à une hauteur de 281 mètres dans l'hypothèse d'une atmosphère uniforme.

Soient : x l'épaisseur de l'atmosphère supposée uniforme ($x = 7.991$ mètres), x_0 celle de l'atmosphère au-dessus de la Tour ($x_0 = 7.710$ mètres), I l'intensité de la radiation solaire arrivant au niveau du sol, I_0 l'intensité au sommet de la Tour, et N le nombre de gros ions par cm³ au voisinage du sol. Supposons que N subit, à mesure que l'altitude augmente, une décroissance exponentielle identique à celle de la pression atmosphérique. Les rayons solaires arrivant généralement sous une incidence oblique, et les mesures n'étant pas faites simultanément en haut et en bas, les épaisseurs traversées seront εx et $\varepsilon_0 x_0$ ⁽⁴⁾. On aura, en représentant par α le coefficient d'absorption :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha N(\varepsilon x - \varepsilon_0 x_0)}.$$

⁽¹⁾ Désignons par le terme « noyaux » et les gros ions et les centres neutres. Dans l'état d'équilibre, le rapport du nombre de gros ions d'un signe (N) au nombre de noyaux (N^1) est constant. Pour l'air d'une pièce, $N^1 = 3,28 N$ (NOLAN, BOYLAN and de SACHY, *P. R. I. A.*, **37** (1925), p. 4). Pour l'air libre, des observations de GOCKEL conduiraient à $N^1 = 6,56 N$, si on fait une distinction entre les gros ions et les ions intermédiaires, et à $N^1 = 4,37 N$, si on assimile les ions intermédiaires aux gros ions. (Nous déduisons ces relations des résultats de GOCKEL, *loc. cit.*, pp. 16, 31 et 28). Nous admettons pour l'air de Paris la relation simple $N^1 = 4 N$.

⁽²⁾ *Ninth Report on Atm. Pollution*, pp. 46-57.

⁽³⁾ Cf. ABBOT : *Annals of the Astrophys. Obs. of the Smith. Inst.*, vol. III (1913), p. 109.

⁽⁴⁾ ε et ε_0 ont été calculés d'après la loi de la secante, qui donne des valeurs sensiblement concordantes avec les autres formules pour des distances zénithales inférieures à 75°.

Chaque série de mesures fournit une valeur de α . La valeur moyenne de toutes les mesures, $\alpha = 0,4 \cdot 10^{-10}$, correspond à une absorption de l'ordre de 1 % pour une couche atmosphérique d'épaisseur 300 mètres, et une concentration de 10.000 gros ions par cm^3 au voisinage du sol.

Dans ce qui précède, nous avons supposé que les noyaux s'élèvent à de grandes altitudes. Les résultats d'une étude de M. Besson ⁽¹⁾ sur la perte de lumière qu'occasionnent les fumées à Paris et dans les environs s'accordent avec cette hypothèse. La perte de lumière, quand le vent vient de la ville, est de l'ordre de 20 % à 10 kilomètres de l'enceinte fortifiée. La perte paraît plus forte à cette distance qu'à la périphérie de l'agglomération urbaine (sans doute parce que, à la hauteur des nuages, l'action condensatrice des fumées ne se fait sentir qu'avec un certain retard), et les observations indiquent qu'à des distances égales du centre de la ville, la perte est moins grande par vent sec que par vent humide. Ces dernières conclusions confirment les vues déjà exprimées que ce sont les poussières liquides (gros ions et centres neutres) qui jouent le principal rôle dans l'absorption des rayons lumineux dans les basses couches de l'atmosphère. L'influence des poussières sèches, qui ne condensent pas la vapeur d'eau, est indépendante de l'humidité, et la vapeur d'eau n'a qu'un faible coefficient moyen d'absorption pour l'ensemble de longueurs d'onde du spectre visible ⁽²⁾. Il convient d'examiner la manière dont les poussières liquides peuvent éteindre la lumière.

En partant de l'hypothèse que les noyaux, sous l'action des rayons incidents, deviennent des sources lumineuses et diffusent la lumière, de telle façon que la formule de Lord Rayleigh leur soit applicable, nous avons calculé ⁽³⁾ le rayon des noyaux qui rendrait compte de l'obstruction observée dans nos mesures à la Tour Eiffel, et nous avons trouvé une valeur qui concorde avec les valeurs obtenues par de Broglie et par Nolan par d'autres procédés. Toutefois, il est douteux que la formule de Lord Rayleigh soit strictement applicable aux gros ions, parce que leurs dimensions ne sont pas très petites vis-à-vis des longueurs d'onde de la lumière visible.

La perte de lumière occasionnée par les noyaux serait plutôt due à des réflexions, réfractions et absorption. Par suite de réflexions et de réfractions, une certaine proportion des rayons lumineux sont déviés et ne parviennent pas jusqu'à l'observateur. Nous avons calculé à l'aide d'une formule de Fresnel ⁽⁴⁾ la proportion de lumière réfléchiée par chaque noyau : elle peut expliquer un quart environ de l'obstruction observée.

La plus grande partie de la perte serait due aux matières solides qui constituent le cœur des noyaux. Entourés d'une atmosphère d'eau liquide, les grains absorberont une plus forte proportion du rayonnement qu'ils ne feront dans de l'air parfaitement sec. Si n désigne l'indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air, et r le rayon des grains, la surface absorbante sera $\pi r^2 n^2$ au lieu de πr^2 ⁽⁵⁾. En supposant les grains opaques, la proportion de lumière transmise par une couche d'air d'épaisseur x centimètres, renfermant N' grains par cm^3 (N' égale à 4 fois le nombre de gros ions d'un signe)

⁽¹⁾ *Service physique et météor. de la ville de Paris*, p. 254.

⁽²⁾ L'absorption sélective de la vapeur d'eau ne paraît s'exercer que dans une petite portion de l'infra-rouge.

⁽³⁾ *C. R.*, **184** (1927), p. 1571.

⁽⁴⁾ Voir JAMIN, *Cours de Physique*, Paris, 1881, III, 3^e fasc., p. 481.

⁽⁵⁾ Ceci montre l'importance des poussières liquides pour l'absorption des rayons lumineux. Il est d'autres conséquences importantes. Comme n augmente quand la longueur d'onde diminue, une plus forte proportion de la lumière violette sera absorbée, d'où une explication simple de la couleur des couchers du soleil et de certains brouillards (pea-soup fogs). De même, la perte des rayons ultra-violet dans les villes, serait due, pour la plupart, aux poussières liquides.

sera égale à $e^{-N'\pi r^2 n^2 x}$ (1). En faisant une application numérique de cette expression à l'aide de nos observations pyrhéliométriques, nous trouvons pour le rayon des grains la valeur $r = 1,23.10^{-6}$ centimètres, soit le quart du rayon des noyaux ($4,5.10^{-6}$ centimètres).

Un grain de cet ordre de grandeur présenterait un intérêt particulier pour la condensation de la vapeur d'eau, et la présence de tels grains dans l'atmosphère pourrait expliquer la formation des noyaux dans l'air normal.

Lord Kelvin a montré que par l'effet de la tension superficielle, la pression d'une vapeur saturante au voisinage de la surface d'un liquide doit dépendre de la courbure de cette surface. En supposant la tension superficielle invariable, et en désignant par p la pression de la vapeur saturante au-dessus d'une surface plane, et par p' la pression au-dessus d'une surface de rayon de courbure r , on trouve pour la vapeur d'eau les valeurs suivantes de p'/p correspondant à différentes valeurs de r .

r	10^{-5} cm.	10^{-6} cm.	10^{-7} cm.
p'/p	1,013	1,138	3,631

En réalité, d'après les expériences de Reinold et Rücker, la tension superficielle est une fonction de r : elle est maximum pour une pellicule d'épaisseur $4,2.10^{-7}$ cm., et passe par un minimum pour r voisin de 10^{-6} cm. (2). Donc, un grain de rayon entre 10^{-6} cm. et 10^{-7} cm. ne condenserait la vapeur d'eau que pour une sursaturation très élevée, tandis qu'un grain de rayon dépassant légèrement 10^{-6} cm. provoquerait la condensation encore plus facilement que ne l'indique le tableau (3). Dans l'atmosphère même éloignée de l'état de saturation, l'air se trouve sursaturé en certains endroits d'après la théorie de fluctuations de Smoluchowski (4). La vapeur d'eau ayant condensé sur le grain de rayon de l'ordre de 10^{-6} cm., la gouttelette formée ira en grossissant jusqu'à ce que la tension superficielle commence à augmenter à nouveau : à ce moment, la gouttelette se trouvera dans un état d'équilibre stable, et ne grossira plus que pour une sursaturation relativement élevée (5).

Cette manière de voir s'accorde bien avec les résultats des expériences sur la production des noyaux, et rendrait compte de la relation que nous avons trouvée entre le nombre de gros ions et l'état hygrométrique.

(1) Cette expression, qui, par suite des discontinuités dans le milieu trouble, n'est pas rigoureusement exacte, peut être établie de la manière qui suit. Soit I l'intensité lumineuse reçue par une surface de 1 cm² : chaque grain absorbera une quantité $\pi r^2 n^2$ du rayonnement. Après avoir traversé une couche d'épaisseur dx , la lumière subira une diminution d'intensité $dI = -IN'\pi r^2 n^2 dx$. En intégrant et en désignant par I_0 l'intensité initiale, et par I l'intensité correspondant à l'épaisseur x , on a :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-N'\pi r^2 n^2 x}.$$

(2) Les expériences plus récentes de Johannot rendent probable l'opinion qu'il y a plusieurs minima : elles fourniraient des bases théoriques de l'existence des ions intermédiaires.

(3) Dans les phénomènes de condensation, l'influence des charges ioniques serait nulle pour toute particule de diamètre dépassant 10^{-7} cm. (Cf. CHAUVÉAU, *El. Atm.*, III, p. 162).

(4) PERRIN, *Les Atomes*, p. 190, lib. Alcan, Paris.

(5) Voir au sujet des matières de ce paragraphe : Lord RAYLEIGH, *Phil. Mag.*, 5^e série, t. XXXIII ; Sir J.-J. THOMSON, *Passage de l'Electricité à travers les gaz*, et *Applications of Dynamics to Physics and Chemistry* ; POYNTING and THOMSON, *Properties of Matter* ; CHAUVÉAU, *Electricité Atmosphérique et Le Radium*, 9 (1912), 85 et 161, qui résume des considérations théoriques de Langevin, et OLLIVIER, *Cours de Physique Générale*, t. III, p. 364, et t. II, p. 269.

VI. — EXCÈS D'IONS D'UN SIGNE ⁽¹⁾

1. **Charges libres de l'atmosphère.** — Une étude des charges libres de l'atmosphère a été déjà faite par Daunderer et Norinder à l'aide de mesures sur le champ électrique ⁽²⁾. D'après les résultats de Daunderer, qui s'appliquent aux couches d'air comprises entre 0 mètre et 3 mètres au-dessus du sol, les charges positives sont, en moyenne, prépondérantes, sauf pour les mois d'hiver (décembre à mars) : la valeur moyenne de l'excès positif par mètre cube est de 0,60 U.E.S. Des mesures de Norinder, étendues aux 10 premiers mètres au-dessus du sol, on déduit que les charges négatives sont constamment prédominantes jusqu'à 9 mètres environ pendant l'été, jusqu'à 4 ou 5 mètres pendant l'hiver : à une hauteur de 3 mètres, l'excès négatif est de 0,086 U.E.S. par mètre cube.

Nos résultats, tout en indiquant que les charges libres de l'atmosphère des villes sont presque inappréciables quand on prend les moyennes pour une période assez longue (voir tableaux VI et VII, où r représente le rapport entre le nombre d'ions positifs et le nombre d'ions négatifs) con-

TABLEAU VI (Champ-de-Mars : 2 mètres au-dessus du sol)

Mois	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
r	0,937	0,976	0,871	1,035	0,986

TABLEAU VII (Val-de-Grâce : 20 mètres au-dessus du sol)

Mois	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
r	1,001	1,003	0,999	1,026	1,023	0,999	1,030

cordent bien avec ceux de Norinder. A 2 mètres au-dessus du sol, l'excès est en moyenne négative et égale à 0,076 U.E.S. par mètre cube : la charge totale négative est de 4,400 U.E.S. par mètre cube, et la charge totale positive de 4,324 U.E.S. A une hauteur de 20 mètres environ, la charge libre est en moyenne positive : l'excès positif est de 0,07 U.E.S., la charge totale positive étant de 8,05 U.E.S. et la charge totale négative, de 7,98 U.E.S.

2. **Excès négatif par beau temps.** — Nous avons constaté plusieurs fois par beau temps l'existence d'un excès négatif considérable (en moyenne de 2.000 ions par cm³, soit 0,95 U.E.S. par mètre cube) ⁽³⁾, qui peut expliquer le renversement du champ électrique par ciel serein. L'origine de cet excès se trouve, croyons-nous, dans un fait observé par de Broglie, à savoir la libération, dans certaines conditions, de noyaux liquides d'une surface humide légèrement chauffée ⁽⁴⁾.

(1) Nous n'avons pas utilisé pour cette étude les séries de mesures au cours desquelles les variations irrégulières du nombre de gros ions ont été accusées.

(2) Cette méthode est moins sûre que la méthode fondée sur la mesure du nombre d'ions présents dans l'air : le passage d'un nuage chargé aura, par exemple, une influence sur le champ électrique, mais sera sans influence appréciable sur le nombre de gros ions.

(3) OBALENSKY, *Ann. der Phys.*, **77** (1925), p. 644, a observé un excès négatif du même ordre de grandeur pour une belle journée de septembre.

(4) *Le Radium* (1909), p. 203. Notons que le rayon de ces particules est le même que celui des ions intermédiaires (calculé d'après leur mobilité)

Si les noyaux sont libérés de la surface du sol même sous l'action du soleil ou d'un vent séchant, comme nous le supposons, ils porteront des charges négatives et influenceront sur le champ électrique.

3. **Origine des charges électriques de la pluie.** — Dans une discussion approfondie ⁽¹⁾, Chauveau a envisagé la possibilité des gros ions comme source des charges sur la pluie. Le tableau suivant, relatif aux observations de la deuxième station, donne un appui à cette hypothèse. Les pluies positives sont plus fréquentes que les pluies négatives, mais les fortes charges sont plus fréquemment négatives que positives. Notre tableau montre l'existence d'une asymétrie analogue dans les excès positifs et négatifs des gros ions. L'accord entre les deux groupes de phénomènes est non seulement qualitatif, mais aussi quantitatif, et s'étend à d'autres propriétés, outre les deux que nous venons de signaler. Pour une seule propriété, l'accord quantitatif n'est pas bon. Les observations, utilisées dans la construction du tableau, donnent une concentration moyenne de 16.810 ions positifs par cm³, et une concentration moyenne de 16.668 ions négatifs. D'après la plupart des mesures sur les charges de la pluie, la quantité totale des charges positives reçues par le sol serait au moins deux fois celle des charges négatives. La discordance serait due à ce que nos mesures ont été faites à une hauteur de 20 mètres seulement au-dessus du sol. En invoquant l'hypothèse déjà invoquée par Norinder pour expliquer l'excès négatif des couches d'air à 5 mètres au-dessus du sol, on s'explique la discordance remarquée.

TABLEAU VIII

Excès pour cent	0	1 à 3	4 à 6	7 à 10	11 à 15	16 à 20	21 à 30	31 à 40	> 40
Nombre de fois +.....	15	54	55	48	30	11	4	4	0
Nombre de fois —.....		46	24	21	11	8	13	2	4

On peut donc proposer une explication simple des charges de la pluie. Les pluies, dès leur formation, seraient neutres (pluies ordinaires), ou moitié chargées positivement par induction, moitié chargées négativement (pluies orageuses). En tombant, les pluies absorberaient les gros ions, dont les charges détermineraient (totalement, dans le cas des pluies ordinaires, partiellement, dans le cas des pluies orageuses) les charges observées quand la pluie atteint le sol. Cette explication rendrait compte également des caractères des différentes sortes de pluie.

Expériences sur la fumée de cigarette. — Nous résumons brièvement les principaux résultats de ces expériences.

Une buée de fumée de cigarette contient un nombre d'ions qui se chiffre par centaines de milliards. Si on aspire la fumée dans les poumons, la garde pendant quelques instants, et l'expire ensuite, la fumée qui sort ne renferme que la moitié des ions présents avant l'aspiration. A la sortie, presque tous les ions sont de gros ions, tandis qu'à l'entrée un nombre très élevé de petits ions étaient présents ⁽²⁾. Les différentes teintes que l'on observe dans les fumées, seraient en relation avec la proportion d'ions de grande et de faible mobilité présents dans ces fumées.

⁽¹⁾ *Electricité Atmosphérique*, II, pp. 166-198 ; III, pp. 153-184.

⁽²⁾ Ce qui explique l'abaissement du champ dans le voisinage immédiat des cheminées d'usines.

Nous n'observons aucune différence appréciable entre les charges totales positives et les charges totales négatives de la fumée de cigarette : elle n'aurait pas de charge propre. Mais dans les premières minutes qui suivent la combustion, le nombre de petits ions positifs est inappréciable, tandis que le nombre de petits ions négatifs est très élevé. Le nombre de ceux-ci diminue très rapidement avec le temps, tandis que le nombre de ceux-là augmente lentement ⁽¹⁾. Cette asymétrie entre le nombre de petits ions positifs et négatifs expliquerait certains résultats obtenus par Simpson dans ses expériences sur les tores de fumée de tabac ⁽²⁾.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Par suite de combustion incomplète, les cheminées d'usines versent dans l'atmosphère des particules solides de différentes dimensions. Une certaine proportion de ces particules, de rayon voisin de 10^{-6} cm., condensent la vapeur d'eau très facilement, et s'entourant d'une enveloppe liquide, deviennent des noyaux d'Aitken. 50 % environ des noyaux portent des charges électriques : ce sont les gros ions.

Les noyaux sont en relation avec l'opacité atmosphérique, la visibilité, l'absorption du rayonnement solaire et la formation des nuages inférieurs et des brouillards près du sol. L'humidité relative influe sur la production des noyaux. La plus grande partie de la perte de lumière dans les basses couches de l'atmosphère des villes est due à ces noyaux, qui absorbent plus fortement la lumière violette que la lumière rouge. D'où leur importance au point de vue hygiénique, et on peut attribuer à leur présence en nombre très élevé dans l'air de Glasgow la proportion exagérée de rachitisme dans cette ville. Il importe donc de trouver une méthode d'éliminer ces impuretés de l'air. L'air de Paris contient en moyenne 50.000 de ces particules par cm^3 , et le nombre a augmenté dans le rapport de 1 à 2 environ dans les vingt dernières années.

Les gros ions sont en relation avec les phénomènes électriques, tels que le champ électrique terrestre, les charges libres de l'atmosphère, et les charges électriques de la pluie. Le nombre de gros ions subit une variation diurne, une variation saisonnière et des variations accidentelles analogues aux variations périodiques et irrégulières du champ électrique. Dans certains cas, il y a une action directe des gros ions sur le champ, mais, en général, leur action serait indirecte, et dépendrait de l'influence des gros ions sur les petits ions et la conductibilité, et du fait, jusqu'ici inexpliqué, que le courant électrique vertical de l'atmosphère est sensiblement constant pour tous les points du Globe. Les caractères essentiels de la variation diurne du nombre de gros ions et du champ électrique dans les villes, peuvent être expliqués par la variation diurne de la vitesse de variation de la température de l'air.

Presque toutes les observations sur les gros ions ont été faites jusqu'ici dans les villes. Il convient d'exécuter une longue série de mesures sur les gros ions présents dans l'air de la campagne.

⁽¹⁾ Quelque chose de semblable a été observé pour les petits ions de l'air libre. Une fois, pendant un orage, le nombre de petits ions négatifs, d'abord nul, augmenta progressivement pendant une demi-heure, et le nombre d'ions positifs diminua.

⁽²⁾ Cf. SALLES, Thèse, Paris, 1913, p. 19.

Nos recherches nous ont conduit dans un grand nombre de milieux scientifiques, et les difficultés matérielles ont été considérables : partout nous avons reçu le meilleur accueil et une aide précieuse.

Nous devons remercier tout d'abord M. Maurain, directeur de l'Institut de Physique du Globe de Paris, qui a mis à notre disposition tous les moyens dont il disposait, et qui, avec M. Salles, a grandement facilité nos recherches par ses conseils. La sympathie, qu'ils nous ont toujours témoignée, avec MM. Raphaël Dongier, Charles-Emile Brazier, Henri Labrouste et Louis Eblé, a été, pour nous, le plus précieux des encouragements.

Nous devons aussi des remerciements au professeur Langevin et au professeur Nolan, avec qui nous avons pu discuter certains de nos résultats ; au général Delcambre et à M. Pérès de l'Office National Météorologique, à M. Besson et au personnel de l'Observatoire de la Tour Saint-Jacques, à l'éditeur de *La Nature*, et au personnel auxiliaire de l'Institut de Physique du Globe de Paris.

Que tous veuillent bien trouver ici l'expression de notre vive reconnaissance.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

RÉGIME D'IONISATION ATMOSPHERIQUE

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 6 Mars 1928

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

Ch. MAURAIN.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

S. CHARLÉTY.

IMPRIMERIE DES PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE, 49, Boulevard Saint-Michel, Paris. 834.
Mars 1928.
